

江苏省生态系统服务价值对土地利用/ 土地覆盖变化的动态响应*

戚丽萍 闫丹丹 李静泰 么秀颖 薛媛媛 栾兆擎[†]

(南京林业大学生物与环境学院, 南方现代林业协同创新中心, 南京林业大学林学院, 210037, 江苏南京)

摘要 以江苏省为研究区, 利用 1990—2018 共 4 期土地利用数据, 借助 ArcGIS 技术, 综合运用生态系统服务价值当量修正法、热图聚类分析、弹性分析、IDW 统计分析等方法, 分析了江苏省土地利用与生态系统服务价值的时空动态变化特征, 探讨了研究区特定土地利用类型动态变化对其所提供的生态服务产生的细微差异。结果表明: 1990 年以来, 江苏省耕地、林地、滨海湿地、河流湿地面积逐渐减少, 湖泊湿地、未利用地、建设用地面积不断增加, 其中, 耕地面积减少最多($9.23 \times 10^5 \text{ hm}^2$), 2018 年耕地面积为 $6.50 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 建设用地面积增加最多($8.59 \times 10^5 \text{ hm}^2$), 2018 年建设用地面积为 $1.93 \times 10^6 \text{ hm}^2$; 1990—2018 年江苏省总生态系统服务价值不断升高, 1990 年总生态系统服务价值为 1.61×10^4 亿元, 2018 年为 1.68×10^4 亿元; 耕地、滨海湿地、湖泊湿地对总生态系统服务价值的贡献率较高, 研究期内耕地、林地、滨海湿地与河流湿地的生态系统服务价值减少, 湖泊湿地与未利用地生态系统服务价值增加; 土地利用/土地覆盖(LU/LC)变化决定了生态系统服务价值弹性变化并影响生态系统服务价值, 特别是价值系数比较高的土地利用类型, 其弹性变化对 LU/LC 变化的响应更为明显。

关键词 土地利用/土地覆盖(LU/LC); 生态系统服务价值; 时空动态变化; 弹性分析

中图分类号 X87

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020443

0 引言

“生态系统服务”的概念提供了关于自然促进人类福祉的机制的统一观点。生态系统为人类提供了一系列福祉、健康、生计和生存等至关重要的服务。经济的发展也因生态系统提供的服务产生动力^[1]。生态系统服务价值作为地球经济总值的一部分, 尽管其评定、量化和货币化都比较困难, 但生态系统服务功能的有偿使用是政策措施的前提与迫切需求^[2]。社会经济的快速发展要求研究人与自然系统之间的相互作用^[3]。Costanza 等^[4]和 Daily 等^[5]分别将生态系统服务分为 17 和 18 类, 划分的服务主要有生物多样性生产及维持、产品生产、土壤保持、植物授粉、气候调节等。但是人类对生态系统服务的需求量远超于自然生态系统服务的供应量, 因此人类正面对着环境保护和管理需求的双重压力, 一方面是人类对生态系统服务的需求不断提高, 另一方面生态系统在人类发展的历史进程中受到极大破坏^[6]。

土地利用变化改变了生态系统的结构和功能,

同时也对生态系统服务价值产生影响^[7]。生态系统服务与同一地区不同的土地利用/土地覆盖(LU/LC)有直接关联, 特别是在城市化和人类活动威胁生态系统及其生态功能的情况下^[8]。

目前生态系统服务价值评价主要有功能价值法与当量因子法。功能价值法是基于生态系统服务功能与其单位价值得到生态系统服务总价值, 采用可量化的计算模型对各种生态系统服务价值进行计算^[9-11], 但同一生态服务价值具有多种计算方式, 不同方法计算的结果相差较大。对于大尺度区域估算研究区生态系统服务价值, 当量因子法是比较常用的评价方法, 这一方法的关键在于面积价值量的确定。谢高地等^[2, 12-13]在 Costanza 等^[4, 14]研究基础上制定了中国生态系统服务价值当量表, 其结果更加符合中国生态服务的具体实际情况, 确定了中国一个生态系统服务价值当量的经济价值为 $3\ 406.50 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。由于生态系统服务价值系数的不确定性, 考虑到同一生态系统类型在不同区域上存在结构和质量的差

* 国家自然科学基金资助项目(41871097, 41471078); 江苏省农业科技自主创新资助项目(CX(18)2026); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD); 江苏省“333 高层次人才培养工程”资助项目

[†] 通信作者: 栾兆擎(1976—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 湿地生态学, E-mail: luanzhaoqing@njfu.edu.cn

收稿日期: 2020-11-28

异问题,可以利用生物量、植被覆盖度与净初级生产力作为修订系数对生态系统价值进行修正,从而有效地反映林地、耕地具有大量植被覆盖的土地利用类型,但是对未利用地、各类型湿地的生态服务价值评价并不适用^[15]. 经济学中弹性概念是指一个变量对另一个变量变化的敏感性. 借用敏感性指数(CS)确定生态系统服务价值随时间变化对生态系统价值系数(VC)的依赖程度^[16-18],以此验证生态价值系数是否适合研究区的研究,但该方法往往忽视了市场需求^[19].

为了实现自然资源的可持续利用,生态系统服务和LU/LC的研究成为当下的研究热点. Wang等^[20]、李哲等^[21]、韩增林等^[22]采用生态系统服务当量价值法,计算了不同土地利用类型对应的生态系统服务价值,但这些研究未考虑特定地区由于土地利用分布不均而导致的生态系统服务异质性,以及生态系统服务价值与土地利用变化的内在关系,无法表征特定的土地利用类型动态变化对其所提供的生态服务产生的细微差异.

目前,江苏省发展进入转型期,城市化进入加速期,生态省建设快速推进,土地利用面对严峻挑战. 为科学评估全省生态系统服务价值以及土地利用类型变化,本研究以生态系统服务价值为基础,以研究区与全国粮食面积产量比值作为生态系统服务价值的修订系数,结合燕守广等^[15]、王磊等^[23]、许妍等^[24]、张兴榆等^[25]、Zhao等^[26]、高崑等^[27]对江苏省生态服务价值及湿地生态服务价值的研究成果,确定江苏省不同土地利用类型的生态系统服务价值当量,根据生态服务价值当量与土地利用类型的面积得到研究区生态系统服务价值,综合运用热图聚类分析、弹性分析、IDW地统计分析等方法,量化了江苏省生态系统服务价值与LU/LC之间的权衡关系和协同关系,分析了江苏省生态系统服务价值时空动态变化,突显不同土地利用变化对其提供的生态系统服务价值的细微变化,以期江苏省优化土地利用结构、促进生态系统可持续发展、增加自然资本提供科学决策依据.

1 研究区概况

江苏省(30°45'~35°08'N, 116°18'~121°57'E)位于中国东部沿海,全省土地面积 $10.72 \times 10^5 \text{ km}^2$,占全国面积的1.12%. 根据江苏省不同时期遥感解译分析数据,利用ArcGIS 10.3创建渔网法(Fishnet)将江苏省划分为8个网格(1~8),研究特定区域的土地利用类型变化,避免把研究区作为整体而忽略了因土地

利用类型地区分布不均形成的不同生态系统(图1). 江苏省地理位置优越,跨江滨海,多湖泊,主要湖泊有太湖、洪泽湖、天目湖、高邮湖、阳澄湖、骆马湖、云龙湖等,有长江与淮河2大水系. 地势平坦,以平原为主,自然资源属性好,土地利用充分,开发利用效率高. 沿海滩涂面积约占全国总滩涂面积的25%. 本区属温带向亚热带过渡气候,四季分明,气候温和,雨量适中.

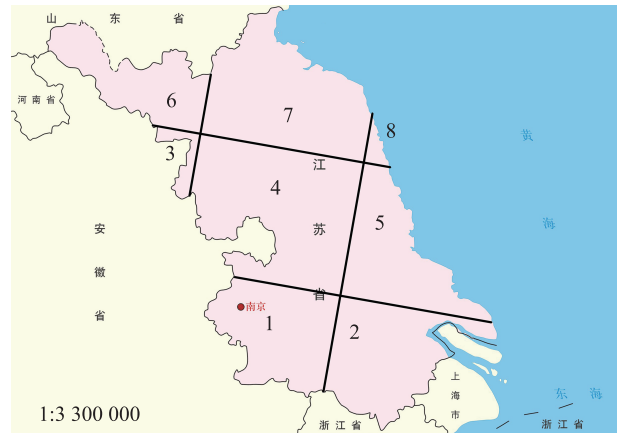


图1 江苏省网格划分

当前江苏省经济继续保持较快平稳增长,增长方式进入转型期,城市化进入加速期,大量农村人口向城市转移,生态省建设快速推进^[28]. 但是江苏省人多地少,人地矛盾在今后的发展过程中将日益突出.

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源 1990—2018年江苏省土地利用数据集来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),通过人工目视解译、野外实地验证修改矢量数据栅格化生成1 km的土地利用图,综合评价精度达到94%,符合本研究需要. 社会数据资料主要来源于《江苏省统计年鉴》. 结合江苏省实际情况,本研究将土地利用类型重新划分为耕地(水田、旱田)、林地(林地、灌木林、疏林地、其他林地)、滨海湿地(滩涂)、湖泊湿地(湖泊、水库坑塘、滩地)、河流湿地(河渠)、建设用地(城镇用地、农村居民点、其他建设用地)和未利用地(盐碱地、沼泽地)等(图2).

2.2 研究方法

2.2.1 生态系统服务价值核算 本文在借鉴已有的研究方法基础上,对研究区不同生态系统面积服务价值当量进行时间与空间的修订. 首先在时间上计算江苏省与全国粮食面积产量比值,以此作为修订系数,具体修订方法为

$$\lambda = P/P_0, E_i = \lambda \times E_{0i},$$

式中: λ 为地区修订系数; P 、 P_0 分别为江苏省粮食平均面积产量和全国粮食平均面积产量; E_i 为第 i 类土地利用类型经地区修订后的生态服务功能当量; E_{0i} 为第 i 类土地利用类型全国平均的生态服务功能当量, $i = 1, 2, \dots$, 依次对应耕地、林地、滨海湿地、湖泊湿地、河流湿地、建设用、未利用地。

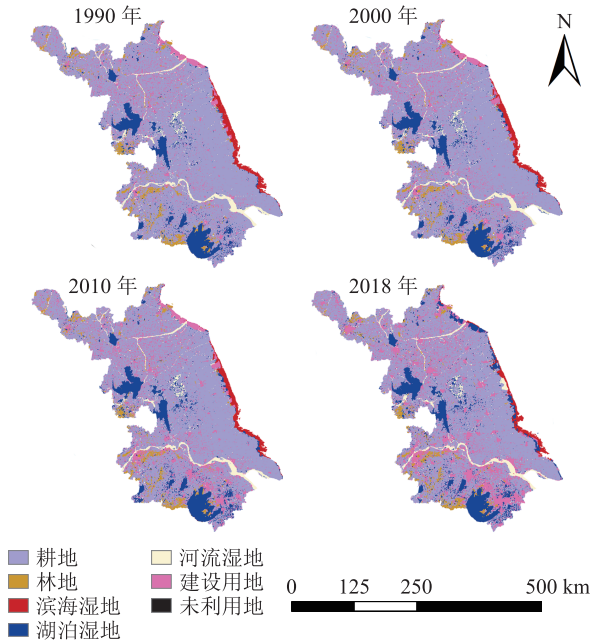


图 2 1990、2000、2010、2018 年 LU/LC 类型分布

根据研究期内江苏省实际粮食平均面积产量 $5\ 925.34\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 同期全国粮食面积产量 $4\ 617\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 以此得出研究区生态系统服务当量价值的修正系数为 1.283 4, 即换算得到江苏省 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量为 $4\ 371.90\ \text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$, 生态系统服务价值计算公式为

$$E_{sv} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot V_{C_i},$$

$$E_{svf} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot V_{C_{fi}},$$

$$V_{C_i} = \sum_{f=1}^k E_{C_{fi}} \cdot E_a,$$

式中: E_{sv} 表示生态系统服务价值; A_i 表示第 i 种土地利用类型的面积 (hm^2); V_{C_i} 表示第 i 种土地利用类型的生态系统服务价值系数, 即单位面积生态系统服务价值 ($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); E_{svf} 表示第 f 项生态服务的价值; $V_{C_{fi}}$ 表示 i 种土地利用类型的第 f 项生态系统服务价值系数; $E_{C_{fi}}$ 为某类土地利用类型第 f 项

生态系统服务的价值当量; E_a 为 1 个标准当量生态系统服务价值, 即 $4\ 371.90\ \text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$. 江苏省面积各土地利用类型生态服务价值系数如表 1.

表 1 江苏省各土地利用类型

土地利用类型(i)	生态服务价值系数						$10^3\ \text{元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$
	耕地	林地	滨海湿地	湖泊湿地	河流湿地	建设用地	
价值系数 (V_{C_i})	44.33	442.08	968.57	888.71	360.68	0	7.29

2.2.2 弹性分析 利用敏感性指数来衡量特定区域的 LU/LC 变化率, 对特定区域生态系统服务价值变化率的影响, 确定江苏省生态服务价值变化率随时间变化对 LU/LC 变化率的响应, 同时反映 LU/LC 总的生态服务价值的贡献及其重要性.

$$E_{el} = \frac{(E_{sv,ed} - E_{sv,st})}{E_{sv,st}} \times 100\% / L_{cp},$$

$$L_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^7 \Delta A_i}{\sum_{i=1}^7 A_i} \times \frac{1}{T} \times 100\%,$$

式中: E_{el} 表示生态系统服务价值对 LU/LC 的变化弹性响应; $E_{sv,ed}$ 表示研究期结束时的生态系统服务价值; $E_{sv,st}$ 表示研究期开始时的生态系统服务价值; L_{cp} 表示研究区单一土地利用类型的年变化率, 反映 LU/LC 的转化速度和程度; ΔA_i 是第 i 种土地类型转换面积; A_i 是第 i 种土地类型面积; T 表示研究期内的年份时间段. 本研究建设用地价值当量为 0, 因此并不计入 E_{el} 与 L_{cp} 的计算中.

2.2.3 热图与聚类分析 热图作为一种可视化统计方法, 可以简单地聚合大量数据, 并用颜色梯度变化表示数值大小^[29]. 聚类分析作为一种探索性分析, 通过将数据分为若干类, 其实质是依据研究变量或者样品之间的亲疏关系, 从最相似的对象开始, 逐步聚成一类, 结果以聚类树状图显示, 有助于明确不同数据集的内在关系^[30]. 热图对聚类分析结果的可视化有利于解释实际数据, 但是将热图应用于生态环境服务评价的统计分析研究较少. 采用热图解析土地利用变化与网格之间的相关性, 既可以保留原始数据的完整, 也能使聚类分析结果显示更加直观.

2.2.4 反距离加权插值 (IDW) 分析 反距离加权插值作为空间插值的方法, 根据给定的控制点对和控制点的位移矢量(方向和距离), 实现图像每一个像素点的位移. 反距离加权插值的方法是通过得到每一个像素点和选定控制点对的逼近关系, 以及相

对应的权重关系,求得像素点相对应的变化关系.逼近函数可以理解为对像素点 p 的影响程度,而权重函数则可以对距离的权重,距离越远,权重越小.

3 结果与分析

3.1 江苏省 LU/LC 面积变化 1990年,江苏省耕地是覆盖面积最大的土地利用类型,在网格5中的覆盖面积最大;其次是建设用地、湖泊湿地、河流湿地的覆盖面积;林地、滨海湿地和未利用地3种土地覆盖面积最小.但是滨海湿地、湖泊湿地与河流湿地的面积分别在网格5、4与2中最大,因此,研究区内湿地覆盖是不均匀的;研究区其他土地类型覆盖面积分布也是多种多样的.2000年,耕地仍然是覆盖面积最广的土地类型,但是相比于1990年面积有所减少;其次是建设用地、湖泊湿地、河流湿地面积.全网格中未利用地面积(1817 hm^2)与1990年覆

盖面积相比没有变化,但依然为覆盖面积最小的土地利用类型.就湿地而言,滨海湿地覆盖面积整体呈减少趋势,但在网格7中面积有所增加.湖泊湿地与之相反,整体覆盖面积呈增加趋势,在网格7中面积有所减少.河流湿地在全网格中面积变化不大.2010年,耕地面积持续减少,建设用地面积不断增加,覆盖面积达到 $1.51 \times 10^6 \text{ hm}^2$,仅次于耕地.滨海湿地与河流湿地面积比2000年不断减少,但湖泊湿地面积不断增加,其中滨海湿地面积仅在网格2中有所增加,湖泊湿地面积仅在网格7、8中有所减少.2018年,耕地面积降低至 $6.50 \times 10^6 \text{ hm}^2$,总面积仍然居于首位;就湿地类型而言,2018与2010年相比,滨海湿地覆盖面积继续呈缩减趋势,但湖泊湿地与河流湿地覆盖面积略有增加,其中湖泊湿地覆盖面积在网格1、3、6、7、8有所减少,河流湿地覆盖面积仅在网格3中略有增加(图3).

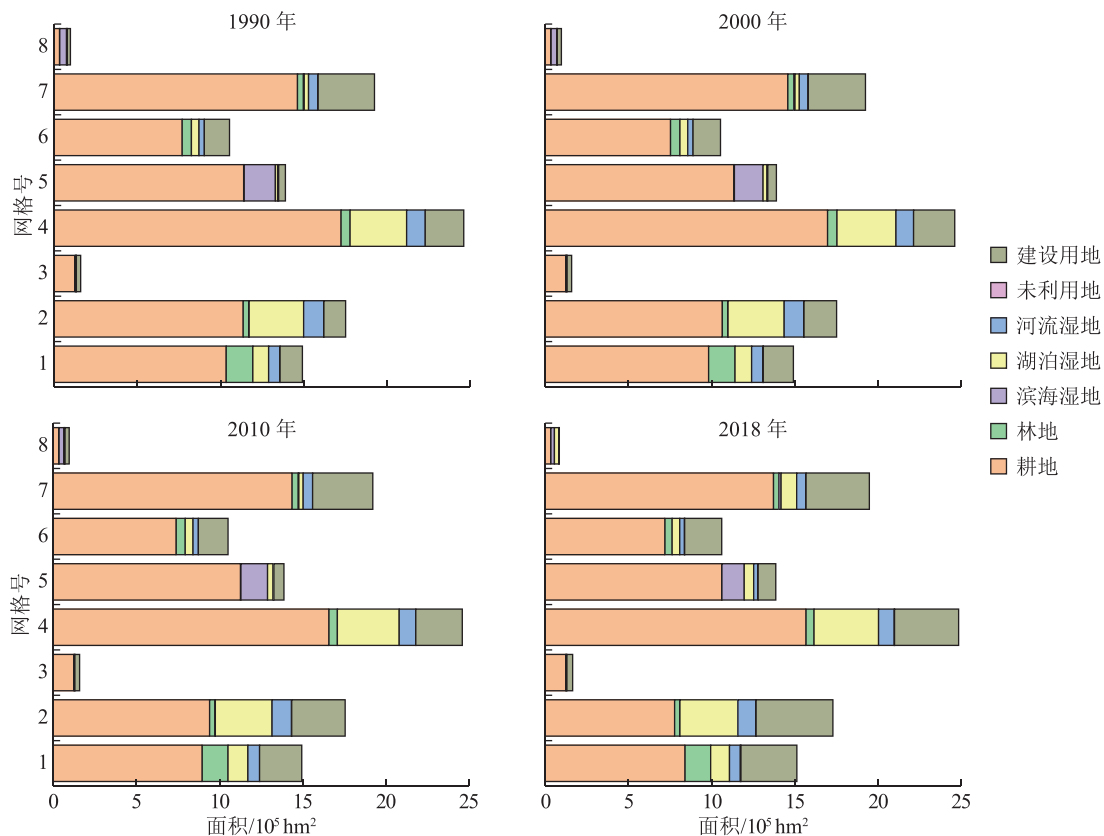


图3 1990、2000、2010与2018年全网格区域面积变化

分1990—2000、2000—2010、2010—2018、1990—2018年4个时间段,利用热图与聚类分析探讨全网格区域土地利用类型的动态变化率情况(图4).1990—2000年,耕地面积除在网格8呈正变化,其余网格均呈负变化;林地面积在全网格区域中呈负变化;就湿

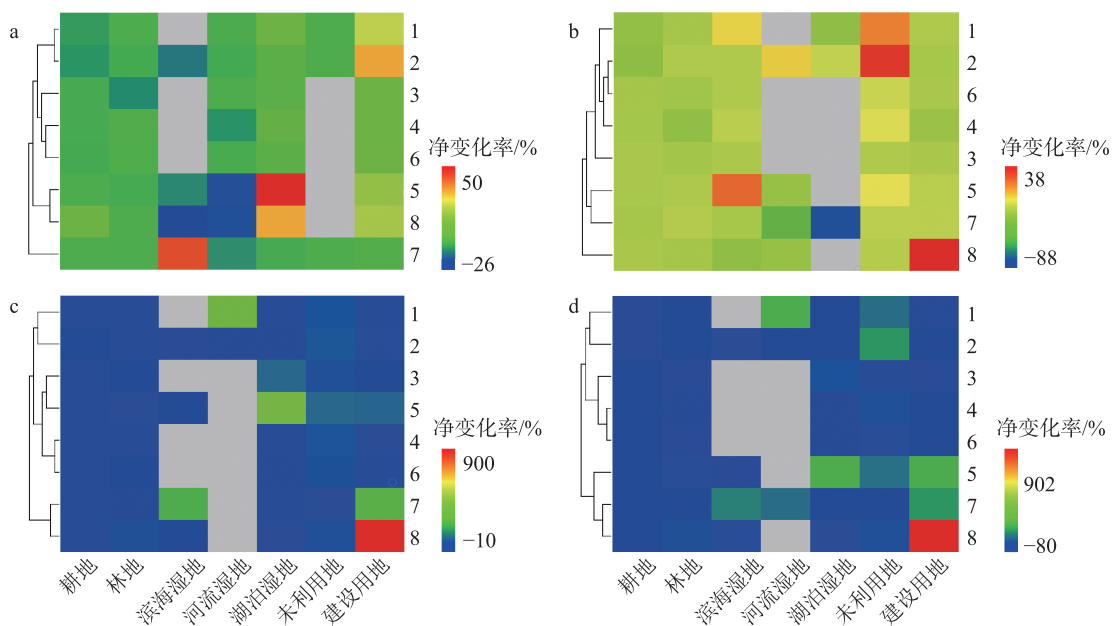
地而言,滨海湿地、河流湿地与湖泊湿地面积在网格5、8中呈显著变化;建设用地面积在网格2中有明显的正变化(图4-a).2000—2010年,耕地、林地与河流湿地面积几乎在全部网格区域内均呈负变化;湖泊湿地与河流湿地面积分别在网格5与8中呈显

著正变化;滨海湿地与未利用地面积在网格7中都出现显著负变化;建设用地面积在全网格区域中为正变化,特别是在网格1与2中正变化极为显著(图4-b)。2010—2018年,耕地面积除在网格8为正变化外,其余网格中耕地均为负变化;林地面积在全网格中呈现负变化,并在网格5与网格8中变化相对明显;滨海湿地与湖泊湿地面积在网格7呈显著的正变化,在网格8中湖泊湿地面积的正变化最为显著;河流湿地面积仅在网格3、5中为正变化,其余网格中皆为负变化(图4-c)。1990—2018年间,耕地与林地面积在网格1~8中仍呈负变化;滨海湿地与未利用地面积仅在网格7与1中呈正变化;河流湿地覆盖面积在网格3、5中呈正变化;湖泊湿地与建设用地面积除网格3与8外,均呈正变化,其中湖泊湿地与建设用地面积分别在网格7、8与2中有显著正变化(图4-d)。

3.2 江苏省不同 LU/LC 生态系统服务价值的时空动态

3.2.1 网格生态系统服务价值变化分析 利用面积价值系数计算江苏省不同时期 LU/LC 提供的生态服务总价值如图5所示。1990年江苏省总生态系统服务价值为 16.11×10^3 亿元,其中湖泊湿地对总生态系统服务价值贡献最大,为 7.56×10^3 亿元;其次为耕地与滨海湿地,未利用地生态系统服务价值最小,仅为0.13亿元。从网格分析来看,网格4总生态系统服务价值最大,其次是网格2与5,网格3总生态系统

服务价值最小(图6)。2000年江苏省总生态系统服务价值 16.14×10^3 亿元,相比1990年略有增长。湖泊湿地总生态系统服务价值为 7.94×10^3 亿元,仍居于首位;其次是耕地与滨海湿地,林地与耕地的生态系统服务价值相较于1990年均有所降低,未利用地的生态系统服务价值与1990年相比没有变化。从网格分析来看,网格4的总生态系统服务价值相较于1990年增加,依然为全网格中最高值,为 4.53×10^3 亿元,网格3总生态系统服务价值最小。2010年,江苏省总生态系统服务价值保持继续增长,为 1.62×10^4 亿元;湖泊湿地总生态系统服务价值在江苏省总生态系统服务价值的占比不断升高,湖泊湿地生态系统服务价值为 8.40×10^3 亿元,相较于2000年,滨海湿地总生态系统服务价值增加,而耕地、林地、河流湿地总生态系统服务价值减少。从网格分析来看,网格4的总生态系统服务价值居于首位。网格3的生态系统服务价值与2000年没有变化。2018年,江苏省总生态系统服务价值为 1.68×10^4 亿元,湖泊湿地总生态系统服务价值持续增加,其次为耕地与滨海湿地。未利用地的总生态系统服务价值相较于2010年略有增加,但生态系统服务价值仍然最低,为0.51亿元。从网格分析来看,相较于2010年,网格4、6、7、8的生态系统服务价值增加,其余网格生态系统服务价值均有减少,网格4的生态系统服务价值最大,网格3的生态系统服务价值减少。



注: 土地利用/土地覆盖面积在个别网格为0, 无法计算面积变化率, 图中显示为灰色空值。

a.1990—2000年; b.2000—2010年; c.2010—2018年; d.1990—2018年。

图4 1990—2018 LU/LC变化热图聚类分析

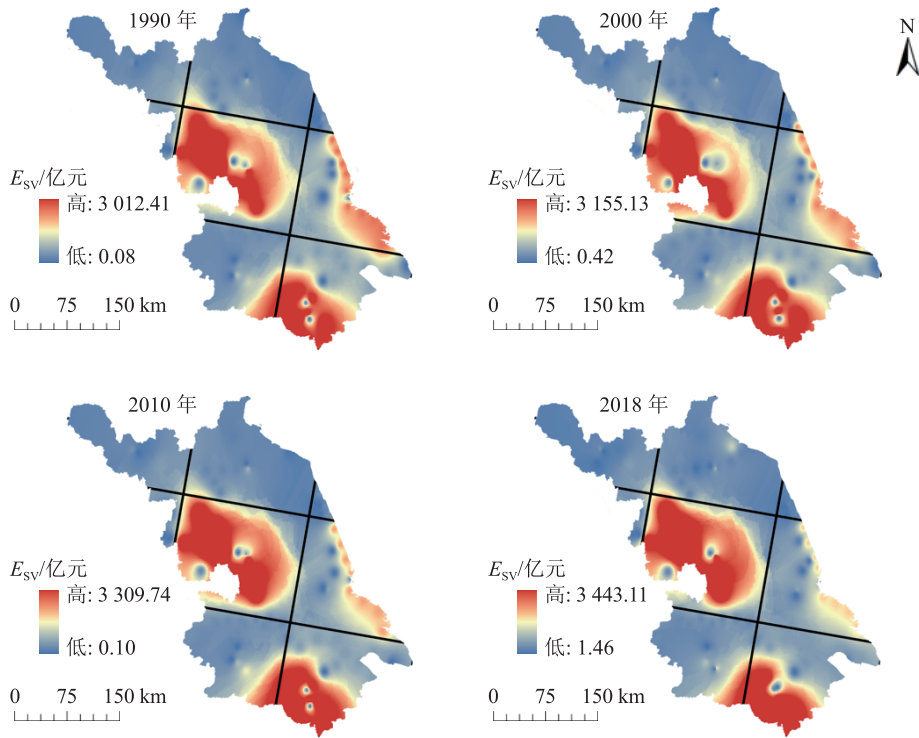


图 5 全区域网格生态系统服务价值 (E_{sv}) 时空变化

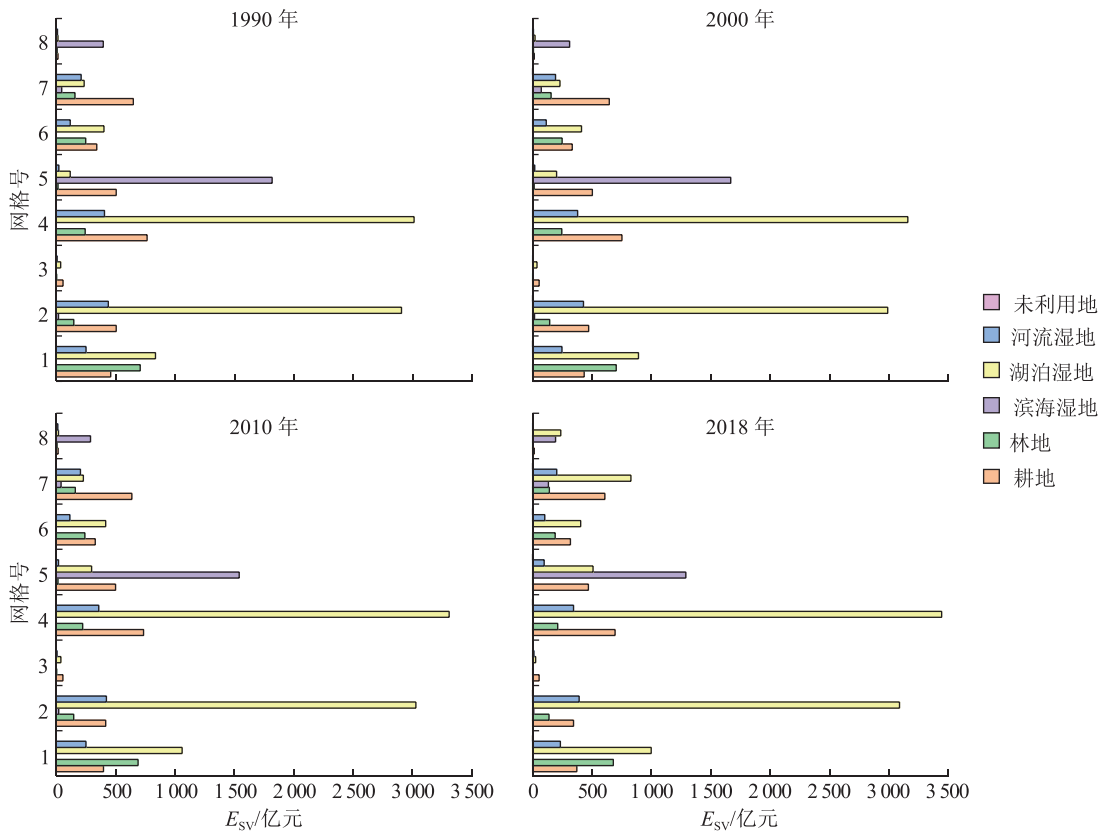


图 6 1990、2000、2010 与 2018 年全网格各土地利用类型生态系统服务价值 (E_{sv})

3.2.2 不同时段生态系统服务价值变化量空间分析 江苏省 4 个时间段 1990—2000、2000—2010、2010—2018、1990—2018 年的生态系统服务价值变化量如图 7 所

示。1990—2000 年,生态系统服务价值变化量的高值出现在网格 2~4,低值主要集中在网格 4,其次是网格 5~7,其生态系统服务价值变化量较小,其中湖泊

湿地生态系统服务价值总变化量最大,为385.45亿元;其次为滨海湿地与耕地,总生态系统服务价值总变化量分别为-205.81亿和-76.41亿元;而林地的生态系统服务价值变化量相对较小。2000—2010年,生态系统服务价值变化量的高值出现在网格2、4,低值主要在网格2、5。生态系统服务价值变化量最大的是湖泊湿地,为457.09亿元;其次为滨海湿地与耕地,分别为-180.94亿和-131.54亿元。河流湿地是3种湿地中总生态系统服务价值变化量最小的类型,为-9.7亿元,未利用地总生态系统服务价值变化量为-18.75亿元。2010—2018年,生态系统服务价值变化量的高值均匀出现在各个网格,低值主要在网格1、2、4、5。湖泊湿地总生态系统服务价值变化量为 1.14×10^3 亿元,仍为最大值。耕地与滨海湿地的总生态系统服务价值变化量接近,分别为-201.27亿和-261.55亿元。河流湿地总生态系统服务价值几乎没有变化。1990—2018年,所有网格区域的生态系统服务价值均呈现高变化趋势,低值主要集中在网格5。湿地类型是所有土地利用类型中生态系统服务价值变化最大的,湖泊湿地、滨海湿地与河流湿地总生态系统服务价值变化量分别为 1.98×10^3 亿、-648.31亿与-64.92亿元。未利用地生态系统服务价值变化量

最小为0.37亿元。

3.3 江苏省生态服务价值对LU/LC的响应 利用敏感性指数,探讨特定地区生态系统服务价值变化对1990—2000、2000—2010、2010—2018、1990—2018年4个时间段的LU/LC变化的响应,结果如图8所示。弹性值越高,生态系统服务价值对土地利用变化的响应越大。1990—2000年,网格5中的湖泊湿地出现高弹性值,其范围为800~1000;其余网格中的各土地利用类型对应的弹性值较低,表明LU/LC的变化对生态系统服务价值没有较大影响。2000—2010年,最大弹性值出现在网格7中的未利用地,弹性值范围为600~750;其次是网格5中的湖泊湿地弹性值为500~600;网格7、8的滨海湿地与河流湿地弹性值变动较大,其余网格呈现低值。2010—2018年,网格7中的未利用地与滨海湿地的弹性值范围为 $2.80 \times 10^3 \sim 3.50 \times 10^3$,网格3与网格5的河流湿地的弹性值较大;其余网格中土地利用类型变化对生态系统服务价值影响较小。1990—2018年,弹性值整体偏高,表明LU/LC的变化对生态系统服务价值有较大影响;特别是网格7中的湖泊湿地弹性值为 $1.20 \times 10^4 \sim 1.50 \times 10^4$,滨海湿地与湖泊湿地的弹性值相对较大。

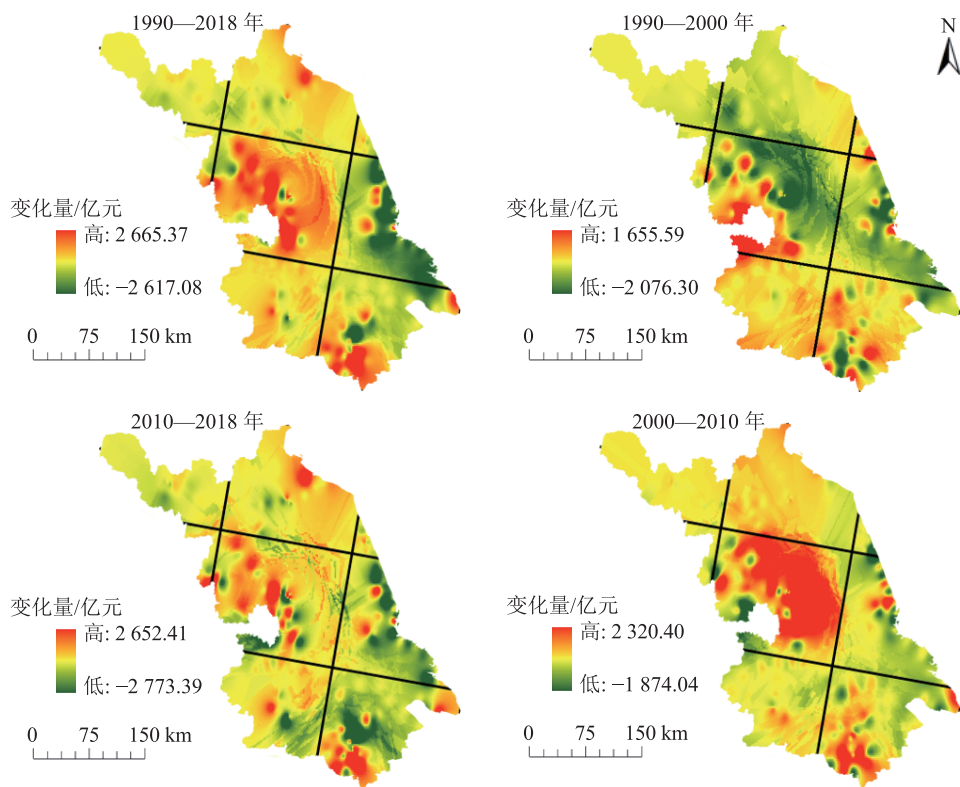


图7 全区域网格生态系统服务价值时空变化量

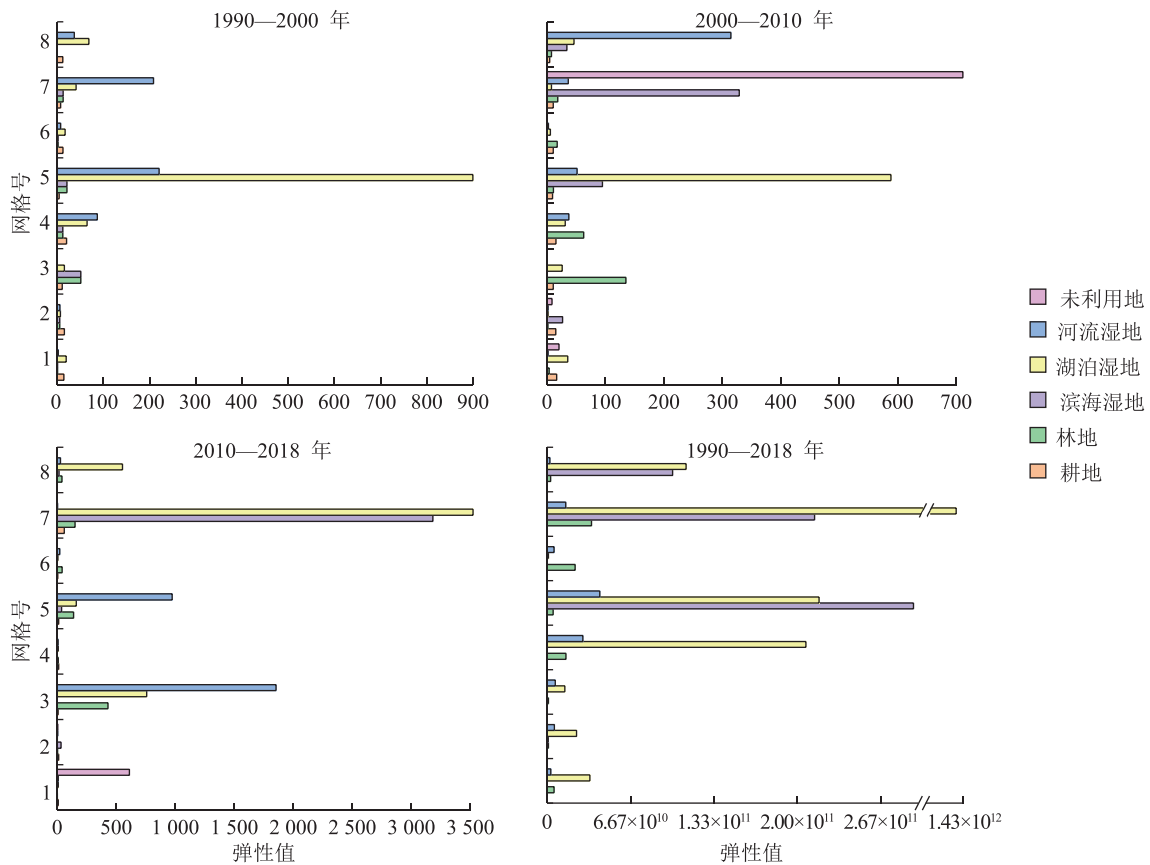


图 8 全区域网格不同土地利用类型的弹性值变化

4 讨论

4.1 土地利用变化 随着社会经济的不断发展、人口增长、产业结构不断优化以及区域资源开发利用强度的加剧和政府政策的影响,江苏省在过去 28 年中土地利用发生显著变化. 1990—2018 年,耕地、林地、滨海湿地与河流湿地面积不断减少,其中耕地面积减少最多,2018 年耕地面积减少至 $6.50 \times 10^6 \text{ hm}^2$;湖泊湿地、未利用地与建设用地面积增加,其中建设用地面积变化最大,1990 年面积为 $1.07 \times 10^6 \text{ hm}^2$,至 2018 年增加到 $1.93 \times 10^6 \text{ hm}^2$. 江苏省经济快速发展,土地资源紧张,是耕地、建设用地产生巨大变化的根本原因. 本研究中湖泊湿地面积增加这一研究结果,与其他文献中湖泊湿地面积减少的结论不同,主要是本文在对湖泊湿地进行分类时,将水库坑塘与滩地划归入湖泊湿地的缘故. 而滨海湿地面积减少的主要原因,包括滨海湿地的围垦、水产养殖、滩涂资源的不合理应用等人为因素,也包括海岸侵蚀与海平面上升等自然因素.

4.2 生态系统服务价值变化 1990—2018 年,江苏省总生态系统服务价值从 1.61×10^4 亿元增至 1.68×10^4 亿元. 耕地、滨海湿地、湖泊湿地对江苏省总生态系统服务价值变化的贡献率较高. 耕地与滨海湿地的

面积不断减少导致耕地、滨海湿地的生态系统服务价值不断减少,湖泊湿地面积的不断增加,在一定程度上增加了江苏省总生态系统服务价值. 研究表明,不同土地利用类型面积变化是导致江苏省生态系统服务价值变化的原因,与雷金睿等^[31]的研究结果相似,但面积变化并不是唯一影响生态系统服务价值变化的因素,不同土地利用类型的生态系统服务价值系数是影响生态系统服务价值的关键因素.

4.3 弹性系数 1990—2000 年,江苏省各 LU/LC 面积变化相对较小,弹性变化较小;而 2000—2018 年,各 LU/LC 面积变化相对较大,弹性变化明显增高,这验证了 Lin 等^[32]提出的生态系统服务价值弹性变化取决于 LU/LC 变化的结论. 研究表明,弹性值不仅与 LU/LC 面积呈正相关关系,而且弹性值越大,相应的土地利用类型价值系数越高,其生态系统服务价值对土地利用变化响应越显著. 未利用地的弹性值显著增加,但生态系统服务价值对土地利用变化响应并不明显,滨海湿地价值系数较高,其弹性变化也相对较为敏感,生态系统服务价值对土地利用变化响应十分显著. 本研究利用特定网格区域的生态系统服务价值变化率与相应 LU/LC 变化率的比值,避免了市场价值对生态系统服务价值弹性系数的影响,同时也能反映出 LU/LC 对总的生态系统服务价值的

贡献及其重要性。

5 结论

江苏省土地利用在研究期内变化显著。耕地面积减少量最多,为 $9.23 \times 10^5 \text{ hm}^2$;而建设用地是面积增加最多的土地利用类型,增加量为 $8.59 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。利用热图可直观有效地揭示土地利用变化趋势,但不能反映出各土地利用类型相互转换的内在机制,相关研究有待进一步深入。

1990—2018年,江苏省总生态系统服务价值累计增加704.73亿元,其中耕地、滨海湿地、湖泊湿地对总生态系统服务价值的贡献率较高。建设用地面积28年来持续增加,在一定程度上降低了江苏省总生态系统服务价值。

LU/LC变化决定了生态系统服务价值的弹性变化,同时对生态系统服务价值产生一定影响。尤其是价值系数越高的土地利用类型影响越显著。弹性分析只能根据土地利用对总生态系统服务价值贡献来说明土地利用类型的重要性,无法评估生态系统服务价值系数的稳健性与敏感性,这也是以后研究中需要进一步解决的难点问题。

6 参考文献

- [1] VARGAS L, WILLEMEN L, HEIN L. Assessing the capacity of ecosystems to supply ecosystem services using remote sensing and an ecosystem accounting approach[J]. *Environmental Management*, 2019, 63(1): 1
- [2] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740
- [3] SU C, FU B J, HE C S, et al. Variation of ecosystem services and human activities: A case study in the Yanhe Watershed of China[J]. *Acta Oecologica*, 2012, 44(46): 57
- [4] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387: 253
- [5] DAILY G C, LOOMES R, ROBYN C, et al. *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems* [M]. Washington D. C: Island Press, 1997
- [6] 白杨, 王敏, 李晖, 等. 生态系统服务供给与需求的理论与管理方法[J]. *生态学报*, 2017, 37(17): 5846
- [7] YUAN K, LI F, YANG H, et al. The Influence of land use change on ecosystem service value in Shang-zhou District[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(8): 1321
- [8] ATAK B, TONYALOGLU E. Monitoring the spatiotemporal changes in regional ecosystem health: a case study in Izmir, Turkey[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(6): 1
- [9] 闫人华, 高俊峰, 黄琪, 等. 太湖流域圩区水生态系统服务功能价值[J]. *生态学报*, 2015, 35(15): 5197
- [10] 李晶, 李红艳, 张良. 关中-天水经济区生态系统服务权衡与协同关系[J]. *生态学报*, 2016, 36(10): 3053
- [11] 商慧敏, 郝敏, 李悦, 等. 胶州湾滨海湿地生态系统服务价值变化[J]. *生态学报*, 2018, 38(2): 421
- [12] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243
- [13] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911
- [14] COSTANZA R, DE GROOT R, SUTTON P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152
- [15] 燕守广, 张慧, 李海东, 等. 江苏省陆地和生态红线区域生态系统服务价值[J]. *生态学报*, 2017, 37(13): 4511
- [16] KREUTER U P, HARRIS H G, MATLOCK M D, et al. Change in ecosystem service values in the San Antonio area, Texas[J]. *Ecological Economics*, 2001, 39(3): 333
- [17] ZHANG X M, XIE H L, SHI J Y, et al. Assessing changes in ecosystem service values in response to land cover dynamics in Jiangxi Province, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(9): 3018
- [18] MAMAT A, HALIK Ü, ROUZI A. Variations of ecosystem service value in response to land-use change in the Kashgar Region, Northwest China[J]. *Sustainability*, 2018, 10(1): 200
- [19] ASCHONITIS V G, GAGLIO M, CASTALDELLI G, et al. Criticism on elasticity-sensitivity coefficient for assessing the robustness and sensitivity of ecosystem services values[J]. *Ecosystem Services*, 2016(20): 66
- [20] WANG Z Y, LECHNER A M, YANG Y J, et al. Mapping the cumulative impacts of long-term mining disturbance and progressive rehabilitation on ecosystem services[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 717: 137214
- [21] 李哲, 张飞, HSIANG T K, 等. 1998—2014年艾比湖湿地自然保护区生态系统服务价值及其时空变异[J]. *生态学报*, 2017, 37(15): 4984
- [22] 韩增林, 孟琦琦, 闫晓露, 等. 近30年辽东湾北部区土地利用强度与生态系统服务价值的时空关系[J]. *生态学报*, 2020, 40(8): 2555
- [23] 王磊, 何冬梅, 江浩, 等. 江苏滨海湿地生态系统服务功能价值评估[J]. *生态科学*, 2016, 35(5): 169
- [24] 许妍, 高俊峰, 黄佳聪. 太湖湿地生态系统服务功能价值评估[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(6): 646
- [25] 张兴榆, 黄贤金, 赵小凤. 江苏省沿海地区土地利用变化的生态系统服务价值核算[J]. *水土保持研究*, 2015,

- 22(1): 252
- [26] ZHAO B, LI B, ZHONG Y, et al. Estimation of ecological service values of wetlands in Shanghai, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2005, 15(2): 151
- [27] 高崧, 崔丽娟, 王发良, 等. 基于大数据的湿地生态系统服务价值评估[J]. *水利水电技术*, 2017, 48(9): 1
- [28] 江苏省人民政府. 江苏省土地利用总体规划(2006—2020年)[A]. 北京: 中华人民共和国自然资源部, 2010
- [29] 刘广. 高维多目标优化的可视化技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014
- [30] SINGH K P, MALIK A, MOHAN D, et al. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India): a case study[J]. *Water Research*, 2004, 38(18): 3980
- [31] 雷金睿, 陈宗铸, 陈小花, 等. 1980—2018年海南岛土地利用与生态系统服务价值时空变化[J]. *生态学报*, 2020, 40(14): 4760
- [32] LIN X J, XU M, CAO C X, et al. Land-use/land-cover changes and their influence on the ecosystem in Chengdu city, China during the period of 1992-2018[J]. *Sustainability*, 2018, 10(10): 3580

Dynamics of ecosystem services value in response to land use/land cover changes in Jiangsu Province

QI Liping YAN Dandan LI Jingtai YAO Xiuying XUE Yuanyuan LUAN Zhaoqing[†]

(College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Joint Innovation Center for Modern Forestry Studies, Nanjing Forestry University, 210037, Nanjing, China)

Abstract Land use data from 1990-2018 in Jiangsu Province were analyzed for temporal-spatial dynamics in land use / land cover changes and ecosystem services. Variations in ecosystem services induced by particular land use were revealed. Specifically, ArcGIS was applied for analysis of ecosystem service value equivalent correction, heat map clustering, EEL elasticity and IDW. From 1990, total areas of cropland, forestland, coastal wetland and river wetland in Jiangsu Province were found to have decreased gradually, but areas of lake wetland, unused land and construction land increased continuously. Cropland showed a maximum reduction of $9.23 \times 10^5 \text{ hm}^2$, construction land area showed a maximum increase of $8.59 \times 10^5 \text{ hm}^2$. Areas of cropland and construction land in 2018 were $6.50 \times 10^6 \text{ hm}^2$ and $1.93 \times 10^6 \text{ hm}^2$, respectively. Total ecosystem service value in Jiangsu Province was found to have continuously increased from 1.61×10^{12} yuan in 1990 to 1.68×10^{12} yuan in 2018. Cropland, coastal wetland and lake wetland have been found to be critical to total ecosystem service value. The ecosystem service value of cropland, forest land, coastal wetland and river wetland were found to have decreased in the study period, but that of lake wetland and unused land have increased. Land use/land cover determined the elastic changes in ecosystem service values and affected total ecosystem service values. Land use type with high value coefficient was found to be more responsive to changes in land use/land cover.

Keywords land use/land cover (LU/LC); ecosystem services value; temporal and spatial dynamic; elasticity analysis

【责任编辑: 刘先勤】